



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 199 52 388 A 1

51 Int. Cl. 7:
H 02 P 7/00
G 05 B 19/19

21 Aktenzeichen: 199 52 388.6
22 Anmeldetag: 31. 10. 1999
43 Offenlegungstag: 28. 6. 2001

DE 199 52 388 A 1

71 Anmelder:
Saffert, Eugen, 98693 Ilmenau, DE
74 Vertreter:
Engel und Kollegen, 98527 Suhl

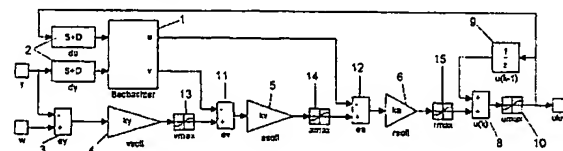
72 Erfinder:
gleich Anmelder
56 Entgegenhaltungen:
E.Saffert u.a.: "Regelung eines integrierten Mehrkoordinatenantriebs". In: Tagungsunterlagen des 41. Internationalen wissenschaftlichen Kolloquiums der TU Ilmenau, 23.-26. September 1996;
E.Saffert u.a.: "Planar Multi-coordinate Drives". In: Tagungsunterlagen PCIM'98 Nürnberg, 26.-28. Mai 1998;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Regelsystem für elektrische Antriebe und Verfahren zur Bahnregelung

57 Die Erfindung betrifft ein Regelsystem für elektrische Antriebe, mit einem Beobachter (1), einem ersten Regelverstärker (4), einem zweiten Regelverstärker (5) und einem dritten Regelverstärker (6), wobei die Ausgangssignale der Regelverstärker zum Antriebseingangssignal zusammengesetzt werden, und die Zusammensetzung der Ausgangssignale der Regelverstärker erfolgt, indem ein zweiter Differenzbildner (11) ein Differenzsignal bildet und dieses dem zweiten Regelverstärker (5) einspeist, und ein dritter Differenzbildner (12) ein Differenzsignal bildet und dieses dem dritten Regelverstärker (6) einspeist. Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Bahnregelung eines elektrischen Antriebs, dessen mögliche Bewegungsbahnen in einem festen Koordinatensystem der Dimension n liegen. Zur Ermittlung des Stellgrößenvektors wird eine Transformation in ein mitbewegtes Koordinatensystem durchgeführt.



virtuelle Kaskadenregelung

DE 199 52 388 A 1

BEST AVAILABLE COPY

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Regelsystem für elektrische Antriebe, mit einem Beobachter, der ein erstes Antriebsausgangssignal und ein erstes Antriebseingangssignal empfängt und ein erstes Zustandsänderungssignal und ein zweites Zustandsänderungssignal ausgibt; und mit einem ersten, einem zweiten und einem dritten Regelverstärker, deren Ausgangssignale zum Antriebseingangssignal zusammengesetzt werden.

Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zur Bahnregelung von elektrischen Antrieben, welches zur Ansteuerung eines Antriebs verwendet wird, um diesen zu veranlassen, eine vorgegebene Bewegungsbahn abzufahren.

Aus dem Stand der Technik sind verschiedene Regelungen für elektrische Antriebssysteme bekannt, die insbesondere der Lageregelung bzw. Positionsregelung dienen. Damit ein ein- oder mehrachsiger Antrieb eine vorgegebene Bahn abfährt, beispielsweise um eine Materialbearbeitung mit einem angeschlossenen Werkzeug auszuführen, generieren die bekannten Regelsysteme eine Folge von Positionssollwerten (Solltrajektorie) und versuchen den Antrieb derart anzusteuern, daß dieser möglichst verzögerungsfrei diese Positionssollwerte anfährt. Die Tatsache, daß die Antriebe den Solltrajektorien nicht verzögerungsfrei folgen können, bedingt zwangsläufig systematische Fehler hinsichtlich der kinematischen Parameter und Unsynchronitäten zwischen mehreren Achsen des Antriebssystems. Sofern mehr als eine Achse anzusteuern ist und komplexere Bewegungsbahnen beschrieben werden müssen, führt dies bei der Berechnung der Solltrajektorien zu einem erheblichen Rechenaufwand, der bei der Koordinierung mehrerer Antriebsachsen die Leistungsfähigkeit eines im Regelsystem integrierten Prozessors schnell überschreiten kann. Die bekannten Regelsysteme bereiten auch besondere Schwierigkeiten, wenn während des Abfahrens der vorgegebenen Bewegungsbahn unvorhergesehene Störungen auftreten, die beispielsweise eine von mehreren Antriebsachsen übermäßig abbremsen. In solchen Fällen ist es für das Regelsystem zumeist nicht möglich, den plötzlich-größer werdenden Unterschied zwischen Positionssollwert und tatsächlicher Position des Antriebs unter Einhaltung von vorgegebenen Grenzparametern (maximale Geschwindigkeit, maximale Beschleunigung, maximale Änderung der Beschleunigung) rechtzeitig wieder auszugleichen.

Aus dem Artikel "Regelung eines integrierten Mehrkoordinatenantriebs", E. Saffert u. a., Tagungsunterlagen des 41. Internationalen wissenschaftlichen Kolloquiums der TU Ilmenau, 23.-26. September 1996, ist eine Regelung bekannt, die einen sogenannten Beobachter enthält. In einen solchen Beobachter ist ein Systemmodell des Antriebssystems implementiert, wobei die Modellierung zum Ziel hat, daß das Systemmodell mit dem echten System weitgehend übereinstimmt. Durch den Beobachter können somit Zustandsvariablen für den Regelalgorithmus bereitgestellt werden, die am echten System weder gemessen noch unmittelbar aus vorhandenen Meßwerten berechnet werden können.

Ein vergleichbares Regelsystem ist auch in dem Artikel "Planar Multi-coordinate Drives", E. Saffert u. a., Tagungsunterlagen PCIM '98 Nürnberg, 26.-28. Mai 1998 angegeben. Diese Regelsysteme lassen sich auch als inkrementelle Zustandsregelung bezeichnen, die unten in Bezug auf Fig. 1 näher erläutert wird. Der Nachteil dieser bekannten Regelung besteht u. a. darin, daß größere Regelabweichungen nur schlecht verarbeitet werden können oder zu unerwünscht hohen Abweichungen der sonstigen Parameter des Bewegungsablaufes führen.

Es besteht daher ein Bedarf an einem verbesserten Regelsystem und einem Verfahren zur Bahnregelung, welche die Nachteile des Standes der Technik vermeiden und den Bewegungsablauf in einem Antriebssystem mit möglichst geringen Abweichungen von der vorgegebenen Bahn erzielen.

Diese und weitere Aufgaben werden einerseits durch das im Anspruch 1 angegebenen Regelsystem und andererseits durch das im Anspruch 8 angegebene Verfahren gelöst.

Das erfindungsgemäße Regelsystem bietet den Vorteil, daß aufgrund der detaillierteren Modellierung des Antriebssystems im Beobachter und der Verwendung zusätzlicher Regelemente die kinematischen Parameter der Bewegungsabläufe aus der gemessenen Position heraus mit hoher Genauigkeit berechnet werden können, ohne daß zusätzliche Sensoren erforderlich sind. Dabei ist es besonders vorteilhaft, daß die Meßdaten innerhalb der erfindungsgemäßen Kaskadenregelungsstruktur zur Korrektur von Fehlern in den kinematischen Parametern des Bewegungsablaufs verwendet werden, bevor es zu signifikanten Bahnfehlern und Unsynchronitäten kommt.

Bei einer abgewandelten Ausführungsform des Regelsystems liefert der Beobachter zwei weitere Regelsignale, welche die Zustandsparameter eines elastischen Systems beschreiben. Um kompliziertere Antriebssysteme exakt regeln zu können, ist es nicht ausreichend, diese als eine punktförmige Lastmasse zu betrachten. Vielmehr müssen die meisten Systeme als eine Massen-Feder-Kombination beschrieben werden, um die elastischen Eigenschaften des Systems zu berücksichtigen. In eine genauere Regelung müssen daher der jeweilige Verformungsweg und die Verformungsgeschwindigkeit des Federelements einbezogen werden.

Bei einer abgewandelten Ausführungsform werden zusätzlich Sollwerte für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung in das Regelsystem eingespeist und dort in erfindungsgemäßer Weise verarbeitet. Damit ist es möglich, eine Vorsteuerung der Dynamik des Betriebssystems auszuführen.

Eine nochmals abgewandelte Ausführungsform des Regelsystems ermöglicht die Beschleunigungsvorsteuerung die Kompensation auftretender Fliehkräfte während der Steuerung des Antriebssystems. Dazu wird die Beschleunigung angepaßt auf die auftretenden Fliehkräfte vorgewählt. Dieses Regelsystem ist besonders nützlich, wenn Kreise oder Kreisbahnsegmente von dem Antriebssystem abgefahren werden sollen.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Bahnregelung kann vorteilhaft in solchen Regelsystemen aber auch bei einer Vielzahl anderer Regelsysteme eingesetzt werden. Erfindungsgemäß erfolgt die Bahnregelung durch die Transformation der Regelabweichung in ein mitbewegtes Koordinatensystem, wodurch der gesuchte Stellgrößenvektor besonders einfach bestimmt werden kann. Nach Ermittlung des Stellgrößenvektors durch das Regelsystem erfolgt schließlich eine Rücktransformation in das feste Koordinatensystem des Antriebssystems.

Weitere Einzelheiten, Vorteile und Weiterbildungen ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen, unter Bezugnahme auf die Zeichnung. Es zeigen:

Fig. 1 ein Blockschaltbild, welches die allgemeine Struktur eines sogenannten Beobachters in Verbindung mit einem realen System nach dem Stand der Technik darstellt;

Fig. 2 ein Blockschaltbild, welches die allgemeine Struktur einer inkrementellen Zustandsregelung nach dem Stand

der Technik zeigt;

Fig. 3 ein Blockschaltbild, welches ein erfindungsgemäßes Regelsystem gemäß einer ersten Ausführungsform darstellt;

Fig. 4 ein Blockschaltbild einer zweiten Ausführungsform des Regelsystems, bei welchem zusätzlich die Vorsteuerung der Dynamik des Antriebssystems möglich wird;

Fig. 5 drei Diagramme, die das Verhalten eines Antriebssystems kennzeichnen, welches ohne und mit dem Regelsystem gemäß Fig. 4 angesteuert wird;

Fig. 6 ein Blockschaltbild einer abgewandelten Ausführungsform des Regelsystems, die sich insbesondere zur Regelung elastischer Systeme eignet;

Fig. 7 eine Modelldarstellung eines elastischen Antriebssystems, für welches das Regelsystem gemäß Fig. 6 anwendbar ist;

Fig. 8 eine Darstellung der Beziehung zwischen einem festen xy-Koordinatensystem des Antriebssystems und einem transformierten, bewegten ze-Koordinatensystem zur Durchführung der erfindungsgemäßen Bahnregelung;

Fig. 9 einen Ablaufplan der prinzipiellen Verfahrensschritte zur erfindungsgemäßen Bahnregelung in einem Mehrkoordinatenantrieb;

Fig. 10 ein Blockschaltbild eines Regelsystems, welches die erfindungsgemäße Bahnregelung ausführt;

Fig. 11 eine Prinzipskizze des Ablaufs der Bahnregelung bei der Bewegung entlang eines Kreisbogensegments.

Fig. 1 zeigt ein Blockschaltbild einer Kombination zwischen einem zu regelnden System und einem sogenannten Beobachter, wie sie aus dem Stand der Technik bekannt ist. Bei der Versendung eines Beobachters zur Regelung eines Systems geht man davon aus, daß die Änderungen der Zustände des Systems vom Beobachter identisch simuliert werden können, wenn die Eingangsgrößen bekannt sind und die Systemparameter vollständig in den Beobachter implementiert wurden. Für die nachfolgenden Betrachtungen handelt es sich bei dem System um ein Antriebssystem, insbesondere einen elektrischen Antrieb, und die von dem Antrieb ausgeführten Bewegungen werden als Zustandsänderungen des Systems verstanden. Der theoretische Ansatz, daß sowohl Eingangsgrößen als auch Systemparameter exakt bekannt sind, wird in der Praxis nur bedingt erfüllt. Daher müssen im Regelsystem die meßbaren Ausgangsgrößen des Systems vorhergesagt (beispielsweise durch eine geeignete Berechnung) und anschließend mit den tatsächlich gemessenen Ausgangsgrößen verglichen werden. Auf diese Weise wird ein Fehler bestimmt, der dann in das Regelsystem als Korrekturterm K eingeführt wird, um durch Berücksichtigung dieses Korrekturterms die Reduzierung des Fehlers zu erreichen. Das in Fig. 1 dargestellte System kann mathematisch durch eine zeitdiskrete Zustandsraumbeschreibung wie folgt definiert werden:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$$

$$y_k = Cx_k$$

Da in dieser Patentanmeldung übliche Bezeichnungen für regelungstechnische Variablen verwendet werden, einzelne dieser Variablen aber auch zur Bezeichnung von Koordinatensystemen dienen, sei zur Klarheit die Bedeutung der Variablen explizit angegeben:

im regelungstechnische Sinne gilt:

y = Vektor der Regelgrößen

x = Vektor der Zustandsgrößen

u = Vektor der Stellgrößen

e = Vektor der Regelabweichungen

für die Koordinatensystem der Bahnregelung gilt:

x = x-Vektor des (festen) xy-Koordinatensystems

y = y-Vektor des (festen) xy-Koordinatensystems

z = z-Vektor (Richtungsvektor) des (bewegten) ze-Koordinatensystems

e = e-Vektor (Abweichungsvektor) des (bewegten) ze-Koordinatensystems

Die Bezeichnungen werden auch als Index verwendet und kennzeichnen dann die Komponente eines Vektors, die in Richtung des entsprechenden Koordinatenvektors weist, z. B.

v_e = Geschwindigkeit in Richtung des e-Vektors

Da in der Praxis zumeist mehrere Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen verarbeitet werden müssen, werden die Eingangsgrößen als Vektoren angegeben und die Parameter des Systems werden durch Systemmatrizen repräsentiert. Zur speziellen Definition des Beobachters müssen die Schätzwerte A^* , B^* und C^* , welche mit gewissen Abweichungen die Systemmatrizen A , B und C repräsentieren, bestimmt und weiterhin ein Korrekturvektor K festgelegt werden. Die Details des Aufbaus und des Einsatzes eines solchen Beobachters sind aus dem Stand der Technik bekannt, so daß hier keine weiteren Erläuterungen angegeben werden. Bei der Verwendung des Beobachters im Regelsystem für ein Antriebssystem ist jedoch darauf zu achten, daß die Zustandsvariablen bei der dem Beobachter zugrunde liegenden Modellierung so gewählt werden, daß sie den später durch die Regelung zu beeinflussenden Hilfsregelgrößen entsprechen. So ist es z. B. bei elastischen Systemen (siehe unten) hilfreich, statt der Motorgeschwindigkeit und -position, die Verformungsgeschwindigkeit und Verformung der Elastizität als Zustandsvariable zu verwenden.

Fig. 2 zeigt ein Blockschaltbild einer inkrementellen Zustandsregelung nach dem Stand der Technik, die einen Beobachter verwendet. Bei Antriebssystemen, wie sie beispielsweise für Positionierungsaufgaben oder bei der Werkzeugsteuerung verwendet werden, besteht das allgemeine Regelungsproblem darin, die Position $s(t)$ als Funktion der Zeit einer vorgegebenen Funktion $w(t)$ folgen zu lassen. In der Regel ist die Funktion $w(t)$ nicht explizit angegeben sondern über die folgenden Nebenbedingungen definiert:

$$w(0) = 0, w(t_e) = w_e, |v| \leq v_{\max}, |\alpha| \leq \alpha_{\max}, |r| \leq r_{\max}$$

In einem praktischen Anwendungsfall soll beispielsweise ein Laserwerkzeug mit einer bestimmten Geschwindigkeit auf einem Materialstück entlang fahren, um entsprechende Bearbeitungen (z. B. Schneiden, Schweißen) auszuführen. Bei Regelsystemen nach dem Stand der Technik wird das angegebene Regelungsproblem dadurch gelöst, daß in einem ersten Schritt die Funktion $w(t)$ von einem sogenannten Sollwert- oder Bahngenerator durch Lösen der inversen Kinetik berechnet wird. Der verwendete Regler hat dann eine Folgeregelung auszuführen, um die gewünschte Bewegungsbahn durch das Antriebssystem zu realisieren. Damit der Regler seine Funktion ausführen kann, ist eine gewisse Regelabweichung zwingend erforderlich, die zu einem sogenannten Schleppfehler führt, d. h. die Istposition des Antriebs wird der berechneten Sollposition um diesen Schleppfehler nacheilen. Insbesondere bei komplizierteren Bewegungsbahnen führt dieser Schleppfehler zu teilweise erheblichen Abweichungen zwischen der vorgegebenen Funktion $w(t)$ und der tatsächlich ausgeführten Bewegung. Wie oben dargelegt wurde, ist es für eine Regelung unter Verwendung eines Beobachters erforderlich, das zu regelnde System geeignet zu modellieren, d. h. die Zustände des Systems vorteilhaft zu wählen. Geht man vom dem einfachen Fall der Bewegung eines starren Körpers (Lastmasse) aus, kann die Motorkraft F_M wie folgt beschrieben werden:

$$F_M = k_M \cdot i$$

wobei k_M die Motorkonstante und i der Motorstrom ist.

Für die Bewegung eines solchen Antriebssystems in einer Achse gilt die folgende Gleichung:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{d}{m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_M}{m} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot i$$

$$y = [0 \ 1] \cdot x$$

$u = i$ (Stellgröße u ist der Motorstrom i),

wobei d die Dämpfungskonstante des Antriebs ist.

Das modellierte System hat somit die beiden Zustände Geschwindigkeit v und Position s . Bei der an sich bekannten inkrementellen Zustandsregelung wird nicht der Zustandsvektor

$$x_k = \begin{bmatrix} v_k \\ s_k \end{bmatrix}$$

sondern seine Änderung

$$\Delta x_k = x_k - x_{k-1} = \begin{bmatrix} v_k - v_{k-1} \\ s_k - s_{k-1} \end{bmatrix}$$

verwendet.

Aufgrund von Linearitätsbeziehungen kann diese Änderung des Zustandsvektors mit den normalen Beobachtergleichungen berechnet werden, wenn statt der normalerweise verwendeten Signale

$$u_k = i_k \text{ und } y_k = s_k$$

deren Änderungen

$$\Delta u_k = i_k - i_{k-1} \text{ und } \Delta y_k = s_k - s_{k-1}$$

benutzt werden.

Werden Geschwindigkeit und Beschleunigung durch Differenzquotienten angenähert, d. h.

$$v_k = \frac{s_k - s_{k-1}}{T_s} \quad \text{und} \quad a_k = \frac{v_k - v_{k-1}}{T_s}$$

bei einer Abtastzeit T_s , dann kann die Änderung des Zustandsvektors

$$\begin{bmatrix} a_k \\ v_k \end{bmatrix} = \frac{1}{T_s} \cdot \Delta x_k$$

als Vektor der Beschleunigung und Geschwindigkeit aufgefaßt werden. Werden nun die Skalierung der Zustände bei der Modellierung und die Abtastzeit passend gewählt, z. B. v in mm/s und s in mm, dann sind die Einheiten von

$$\frac{1}{T_s} \cdot \Delta x_k$$

bei einer Abtastzeit von $T_s = 0,001$ s gerade m/s^2 und m/s .

Zum besseren Verständnis wird nachfolgend kurz die aus dem Stand der Technik bekannte inkrementelle Zustandsregelung gemäß Fig. 2 erläutert. Ein Beobachter 1 empfängt zwei Signale du und dy von zwei Differenziereinheiten 2. Die Differenziereinheiten 2 (Sample & Difference = Abtasten und Differenzieren) berechnen die Änderungen ihrer jeweiligen Eingangssignale u und y , und stellen hier die Änderungen der Antriebsstroms du bzw. der Position dy an den Beobachter bereit. Der Beobachter 1 ermittelt unter Verwendung der oben beschriebenen Modellierung die entsprechende Zustandsänderung, die als Beschleunigungssignal a und Geschwindigkeitssignal v ausgegeben wird. Ein erster Differenzbildner 3 bildet ein Differenzsignal aus den Eingangsgrößen y und w und gibt dieses Differenzsignal an einen ersten Regelverstärker 4 ab. Die Ausgangssignale des Beobachters v und a werden an einen zweiten Regelverstärker 5 bzw. einen dritten Regelverstärker 6 gesandt, wobei die drei Regelverstärker 4, 5 und 6 ihre Ausgangssignale an einen Summierer 7 liefern. Der Differenzbildner 3, die Regelverstärker 4, 5, 6 und der Summierer 7 realisieren in dieser Schaltungsstruktur die folgende Reglergleichung:

$$\Delta u_k = k \Delta x_k + l e_k = k(1) \alpha_k + k(2) v_k + l(y_k - w_k)$$

Der erste Summierer 7 liefert sein Ausgangssignal an einen zweiten Summierer 8, der als weiteres Eingangssignal den Ausgang von einem Speicher 9 erhält. Der zweite Summierer 8, der Speicher 9 und ein erster Begrenzer 10 (u_{\max}) realisieren ihrerseits die Reglergleichung:

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k \text{ unter der Nebenbedingung } |u_k| \leq u_{\max}.$$

Hiermit steht am Ausgang der inkrementellen Zustandsregelung ein Stromsignal zur Verfügung, welches dem Antriebssystem eingespeist wird, um dieses zu einer Bewegung auf der vorgegebenen Bahn mit den weiteren vorgegebenen Parametern zu veranlassen, wobei die Regelung bestrebt ist, den o. g. Schleppfehler möglichst klein zu halten, andererseits prinzipbedingt nicht in der Lage sein wird, den Schleppfehler vollständig auszugleichen.

Fig. 3 zeigt ein Blockschaltbild eines erfindungsgemäßen Regelsystems, welches auch als virtuelle Kaskadenregelung bezeichnet werden kann. Die Elemente, die bereits aus dem in Fig. 2 gezeigten Blockschaltbild bekannt sind, wurden mit den gleichen Bezugsziffern bezeichnet. In Abwandlung von dem bekannten Regelsystem liefert der Beobachter 1 die der Geschwindigkeit und der Beschleunigung entsprechenden Ausgangssignale nicht direkt zu den Regelverstärkern sondern jeweils in einen zweiten Differenzbildner 11 (ev) bzw. einen dritten Differenzbildner 12 (ea). Im Gegensatz dazu ist der Summierer entfallen, da die Regelverstärker kaskadiert angeordnet sind. Beim ersten Differenzbildner 3 wurden die Vorzeichen der Eingänge vertauscht, so daß dieser nunmehr den Positionsfehler (ey) mit verändertem Vorzeichen liefert. Durch die neu eingefügten zweiten und dritten Differenzbildner 11, 12 werden die veränderten Vorzeichen berücksichtigt. Aufgrund des vorgeschalteten Differenzbildners 3 liefert der erste Regelverstärker 4 (ky) einen verstärkten Positionsfehler, der einer Sollgeschwindigkeit v_{soll} entspricht. Der zweite Regelverstärker 6 (kv) liefert einen verstärkten Geschwindigkeitsfehler, der einer Sollbeschleunigung a_{soll} entspricht und der dritte Regelverstärker 6 (ka) liefert den verstärkten Beschleunigungsfehler, der dem Sollruck r_{soll} also der Solländerung der Beschleunigung entspricht. Die Hilfsgrößen der Regelkaskade a und v werden vom Beobachter, d. h. virtuell bereitgestellt. Die Verstärkungsfaktoren der drei Regelverstärker 4, 5, 6 wurden in dem gezeigten Blockschaltbild zur Klarheit mit den Größen bezeichnet, die sie verstärken. Dabei gelten die folgenden Zusammenhänge:

$$k_y = 1/k(2) \text{ Verstärkung des Positionsfehlers}$$

$$k_v = k(2)/k(1) \text{ Verstärkung des Geschwindigkeitsfehlers}$$

$$k_a = -k(1) \text{ Verstärkung des Beschleunigungsfehlers}$$

Weiterhin werden die Ausgangssignale der Regelverstärker vor der weiteren Verarbeitung unmittelbar in zugeordnete Begrenzer eingespeist. Ein zweiter Begrenzer 13 (v_{\max}) empfängt das Signal vom ersten Regelverstärker 4, ein dritter Begrenzer 14 (a_{\max}) empfängt das Signal vom zweiten Regelverstärker 5 und ein vierter Begrenzer 15 (r_{\max}) empfängt das Signal vom dritten Regelverstärker 6. Die Begrenzer 13, 14, 15 gewährleisten, daß die von den Regelverstärkern gelieferten Sollwerte und damit die entsprechenden Größen selbst, die Nebenbedingungen (siehe oben) einhalten.

Fig. 4 zeigt ein Blockschaltbild einer abgewandelten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Regelsystems, welches zusätzlich die Möglichkeit einer Vorsteuerung aufweist. Prinzipiell ist es bekannt, parallel zum eigentlichen Regler eine Stellgröße bereitzustellen, um den genannten Schleppfehler zu minimieren. Bei genauer Kenntnis der Parameter des Systems läßt sich beispielsweise der Vorsteuerstrom für die Beschleunigung aus der Sollbeschleunigung a_{soll} wie folgt bestimmen:

$$i_a = a_{\text{soll}} \frac{m}{k_M}$$

Bei der in Fig. 4 dargestellten Ausführungsform werden Vorgabewerte für die Sollgeschwindigkeit und die Sollbeschleunigung in die Kaskadenstruktur eingeführt. Somit wird der gewünschte Vorsteuerstrom unmittelbar vom Regelkreis erzeugt, wobei eventuelle Parameterfehler berücksichtigt werden können. Um dies zu realisieren werden der zweite

und der dritte Differenzbild 11' und 12' um einen weiteren addierenden Eingang ergänzt, an welchem das Geschwindigkeitsvorsteuersignal bzw. das Beschleunigungsvorsteuersignal eingespeist werden.

Einer derartige Vorsteuerung ist beispielsweise hinsichtlich der Radialbeschleunigung sinnvoll, wenn von dem Antriebssystem kreisbogenförmige Bewegungsbahnen ausgeführt werden sollen. In einem derartigen Anwendungsfall muß der Regelkreis eine Radialbeschleunigung erzeugen, obwohl andererseits angestrebt wird, daß sowohl der Radialfehler als auch die Radialgeschwindigkeit gleich Null sind. Es gilt:

$$a_{vs} = a_r = \frac{v_t^2}{r}$$

wobei v_t dem Beobachter des Tangentialregelkreises und r der Beschreibung des abzufahrenden Kreisbogens entnommen werden können.

Für den speziellen Fall, daß eine Kreisbahn oder ein Kreisbahnsegment vom Antrieb befahren werden soll, ist eine Beschleunigungsvorsteuerung besonders nützlich, wenn gleichzeitig die weiter unten detaillierter dargestellte erfindungsgemäße Bahnregelung zum Einsatz kommt.

Fig. 5 zeigt drei Diagramme, die die Wirkung der Verwendung einer zusätzlichen Vorsteuerung gemäß dem in Fig. 4 dargestellten Blockschaltbild auf die Größe des Schleppfehlers deutlich machen. Das Diagramm a) zeigt die Funktion der Position über der Zeit, wobei die Kennlinie 20 den Verlauf des berechneten Sollwertes angibt, während die Kennlinie 21 den Verlauf der tatsächlich vom Antriebssystem eingenommenen Position darstellt. Zur Verdeutlichung ist außerdem der Betrag des Schleppfehlers durch eine Hilfslinie 22 eingezeichnet, der sich aus dem Abstand zwischen berechnetem Sollwert und eingenommener Position zu einem bestimmten Zeitpunkt ergibt. Es ist erkennbar, daß der Schleppfehler bis zu 30% des Gesamtverfahrweges betragen kann. Im Diagramm b) ist der Schleppfehler als Funktion der Zeit eingetragen, wenn eine Geschwindigkeitsvorsteuerung vorgenommen wird. Im Diagramm c) ist wiederum der Schleppfehler als Funktion der Zeit eingetragen, unter der Bedingung, daß eine Geschwindigkeits- und eine Beschleunigungsvorsteuerung in das Regelsystem eingespeist werden. Wie aus den Diagrammwerten erkennbar ist, reduziert sich der Schleppfehler bis auf etwa 0,05% des Verfahrweges.

Fig. 6 zeigt das Blockschaltbild einer weiteren Ausführungsform des Regelsystems. Das in seiner Grundstruktur bereits erläuterte Regelsystem wurde bei dieser Ausführungsform erweitert, um die Einflüsse des elastischen Verhaltens eines realen Antriebssystems zu berücksichtigen. Dieses System wird hier beispielhaft für den allgemeineren Fall angegeben, daß im Regelsystem mehr als zwei Zustandsvariablen zu berücksichtigen sind. Es sind dabei auch Systeme denkbar, die vier, acht oder mehr Zustandsvariablen aufweisen. Die Reglerstruktur wird jedoch immer in der gleichen Weise zu erweitern sein, wie dies nachfolgend in Bezug auf ein elastisches System dargestellt wird. Von einem derartigen elastischen System muß bei einer möglichst genauen Regelung bei sehr vielen praktisch realisierten Antrieben ausgegangen werden. Bisherige Regelsysteme berücksichtigen diese Konstellation jedoch nicht oder nur unzureichend. Elastische Elemente liegen bereits bei einem Antriebssystem vor, welches einen Rotationsmotor verwendet, der eine Last über eine elastische Spindel oder einen elastischen Zahnriemen antreibt.

Zum Verständnis der nachfolgend genannten Gleichungen, welche die Zustände dieses Antriebssystems beschreiben, wird auf die Fig. 7 verwiesen, in der ein mechanisches Modell eines solchen elastischen Systems gezeigt ist. Insbesondere ist die Feder-Dämpfungs-Kopplung zwischen dem Motor und der Last zusätzlich zu berücksichtigen. Die oben genannte Zustandsgleichung für ein starres System erweitert sich damit wie folgt:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_M \\ s_M \\ v_L \\ s_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(d_M + d_L)}{m_M} & -\frac{c_L}{m_M} & \frac{d_L}{m_M} & \frac{c_L}{m_M} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{d_L}{m_L} & \frac{c_L}{m_L} & -\frac{d_L}{m_L} & -\frac{c_L}{m_L} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_M \\ s_M \\ v_L \\ s_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_M}{m_M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot i$$

Um die erfindungsgemäße virtuelle Kaskadierung auszuführen, werden die Zustände des Motors (Motorposition s_M und Motorgeschwindigkeit $v_M = \dot{s}_M$) durch die Zustände der Elastizität (Verformung s_D und Verformungsgeschwindigkeit $v_D = \dot{s}_D$) ersetzt, in dem eine Zustandstransformation ausgeführt wird:

$$s_D = s_M - s_L$$

Damit ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_D \\ s_D \\ v_L \\ s_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{d_M + d_L}{m_M} + \frac{d_L}{m_L}\right) & -\left(\frac{c_L}{m_M} + \frac{c_L}{m_L}\right) & -\frac{d_M}{m_M} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{d_L}{m_L} & \frac{c_L}{m_L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_D \\ s_D \\ v_L \\ s_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_M}{m_M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot i$$

Wie aus dem in Fig. 7 gezeigten Modell ersichtlich ist, kann die zur Beschleunigung der Last erforderliche Kraft nur

aufgebracht werden, wenn die zwischengekoppelte Elastizität deformiert wird. Wird durch den entsprechenden Begrenzer eine maximale Lastbeschleunigung vorgegeben, ist dies somit gleichbedeutend mit der Vorgabe einer maximalen Deformation des Federelements. In dem Blockschaltbild gemäß Fig. 6 sind daher an den entsprechenden Blöcken doppelte Bezeichnungen angetragen. Die durch das Regelsystem realisierte Wirkungskette läßt sich verbal wie folgt darstellen: Lastposition → Lastgeschwindigkeit → Lastbeschleunigung/Deformation → Deformationsgeschwindigkeit → Deformationsbeschleunigung → Deformationsruck

Der besondere Vorteil dieses Regelsystems besteht darin, daß die zwangsläufig auftretenden Deformationen in der Regelung erfaßt und von dieser berücksichtigt werden können. Bei Regelungsverfahren nach dem Stand der Technik führen die vorhandenen Deformationen zu unerwünschten Schwingungen, die durch die Regelung nicht aktiv ausgeglichen werden und damit insbesondere die möglichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des geregelten Antriebssystems deutlich begrenzen. Die praktische Umsetzung im Regelsystem erfolgt durch Hinzufügung von zwei weiteren Differenzbildnern 50 und 51 sowie zwei weiteren Regelverstärkern 52 und 53, die in der bereits erläuterten Weise in die Regelkaskade eingefügt werden. Dabei ist es zweckmäßig nach jedem zusätzlichen Regelverstärker auch zusätzliche Begrenzer 54 und 55 einzufügen, um die maximalen Vorgaben für die Regelgrößen einzuhalten. Der übrige Aufbau des Regelsystems entspricht den bereits vorher beschriebenen Ausführungsformen.

Dem gemeinsamen Ziel, eine verbesserte Regelung eines Antriebssystems bereitzustellen, dient auch das im Anspruch 8 angegebene Verfahren zur Bahnregelung von elektrischen Antrieben. Dieses Verfahren zur Bahnregelung kann insbesondere vorteilhaft bei Anwendung des oben beschriebenen Regelsystems eingesetzt werden, jedoch kommt auch eine Implementierung in anderen Regelsystemen in Betracht.

Die erfindungsgemäße Bahnregelung beruht auf dem Ansatz, daß alle kinematischen Größen der Bewegung eines Systems (sowohl in der Ebene als auch im Raum), also die Position s , die Geschwindigkeit v , die Beschleunigung a , der Ruck r usw., Vektorgrößen sind, die am Schwerpunkt des bewegten Systems angreifen. Unter Beachtung dieser Voraussetzung können diese Größen, die eigentlich in Bezug auf das feste Koordinatensystem des Antriebs definiert sind, in beliebige gedrehte bzw. mitbewegte Koordinatensysteme transformiert werden.

Das in Fig. 8 dargestellte Diagramm verdeutlicht die Zerlegung eines Geschwindigkeitsvektors v in die Komponenten v_x und v_y in dem festen xy -Koordinatensystem, als auch die mögliche Zerlegung in die Komponenten v_e und v_z in einem transformierten, gedrehten ze -Koordinatensystem. Da jeweils die Ordinate und die Abszisse des jeweiligen Koordinatensystems senkrecht zueinander stehen, ist die Verdrehung des bewegten ze -Koordinatensystems gegenüber dem festen xy -Koordinatensystem durch die Angabe eines der beiden Vektoren z oder e im xy -Koordinatensystem eindeutig bestimmt. Der jeweils andere Vektor läßt sich durch einfache Drehung um 90° berechnen.

Ist zum Beispiel

$$z = \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \end{bmatrix}$$

bekannt, so ist

$$e = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z_y \\ z_x \end{bmatrix}$$

Umgekehrt läßt sich der z -Vektor aus dem e -Vektor berechnen.

$$z = \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_y \\ -e_x \end{bmatrix}$$

Zweckmäßigerweise werden die beiden Koordinatenvektoren normiert, so daß ihre Länge gleich 1 ist, bzw.:

$$z_x^2 + z_y^2 = e_x^2 + e_y^2 = 1.$$

Die Transformation des v -Vektors vom feststehenden xy -Koordinatensystem, in dem die Messung erfolgt, in das ze -Koordinatensystem, in dem die Regelung erfolgt, ergibt sich dann nach folgenden Gleichungen:

$$v_z = z^T v_{xy} = \begin{bmatrix} z_x & z_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

und

$$v_e = e^T v_{xy} = \begin{bmatrix} e_x & e_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

bzw. zusammengefaßt:

$$v_{ze} = \begin{bmatrix} v_z \\ e_e \end{bmatrix} = [z \ e]^T v_{xy} = \begin{bmatrix} z_x & z_y \\ e_x & e_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

5

Die prinzipiellen Verfahrensschritte zur Bahnregelung in Mehrkoordinatenantrieben sind in dem in Fig. 9 gezeigten Ablaufplan dargestellt. In einem ersten Hauptschritt 60 muß die Bahn durch Referenzpunkte beschrieben werden. In einem zweiten Hauptschritt 61 wird ein geeignetes bewegtes Koordinatensystem bestimmt. Anschließend erfolgt in einem dritten Hauptschritt 62 die Transformation der Regelabweichung in bewegte Koordinaten im bewegten Koordinatensystem. In einem vierten Hauptschritt 63 werden durch einen Richtungsregler und einen Abweichungsregler die notwendigen Stellgrößen bestimmt. Abschließend werden die ermittelten Stellgrößen in einen fünften Hauptschritt 64 in feste Koordinaten des festen Koordinatensystems zurücktransformiert, um sie dann dem Antriebssystem zuzuführen.

10

Fig. 10 zeigt einen detaillierteren Ablaufplan der Bahnregelung, wobei hier auf die bereits oben dargelegten mathematischen Zusammenhänge Bezug genommen wird. Die in Bezug auf Fig. 9 dargelegten Hauptschritte des Bahnregelungsverfahrens beinhalten somit die folgenden Teilschritte, deren Ablauf und Zusammenhang aus Fig. 10 ersichtlich ist. Die vom Meßsystem ermittelten Regelgrößen 65 (y) werden dem Beobachter 1 und dem ersten Differenzbildner 3 zugeführt. Der Differenzbildner 3 erhält weiterhin Sollwerte 66 (w), die der Bahnbeschreibung dienen. In einem Teilschritt 67 werden aus den Regelgrößen 65 und den Sollwerten 66 die Vektoren z und e des bewegten Koordinatensystems berechnet. Damit ist es im Schritt 68 möglich, die vom Beobachter gelieferten Zustandsvektoren vom festen xy-Koordinatensystem in das bewegte ze-Koordinatensystem zu transformieren. Gleichzeitig können im Schritt 69 die Bahnabweichungen (Fehlervektoren) vom festen xy-Koordinatensystem in das bewegte ze-Koordinatensystem transformiert werden. Es schließt sich im Schritt 70 die eigentliche Regelung an, so daß im Schritt 71 die Rücktransformation des durch die Regelung bereitgestellten Stellgrößenvektors vom bewegten ze-Koordinatensystem in das feste xy-Koordinatensystem möglich ist. Die Stellgrößen (u) werden abschließend im Schritt 72 zum Antriebssystem geliefert.

15

20

25

Die im Ablaufplan gemäß Fig. 10 angegebenen Bezeichnungen sind als Vektoren zu verstehen, deren Dimension von dem jeweiligen Antriebssystem abhängt. Bei planaren Antrieben enthalten diese Vektoren zwei Komponenten (x, y), bei räumlichen Antrieben, wie beispielsweise Robotern, sind mindestens drei Komponenten (x, y, z) erforderlich bzw. n Komponenten für n-achsige Antriebssysteme. Aus Fig. 10 ist auch erkennbar, daß der verwendete Beobachter weiterhin mit den xy-Koordinaten arbeitet, während die Regelung mit ze-Koordinaten arbeitet.

30

Das bewegte Koordinatensystem, d. h. die ze-Vektoren müssen angepaßt auf die gewünschte Bewegungsbahn ausgewählt werden. Für den Fall eines zweidimensionalen Antriebes kann der z-Vektor als Zielvektor und der e-Vektor als Fehlervektor verstanden werden. Das bewegte Koordinatensystem ist so zu definieren, daß der Zielvektor z im jeweiligen Referenzpunkt auf der Bahn immer die Tangente zur Bewegungsbahn darstellt. Bei einer Bewegung entlang einer Geraden wird der Zielvektor also entlang der Bahn ausgerichtet sein. Bei einer Bewegung auf einer Kreisbahn wird der Zielvektor die Tangente am jeweiligen Referenzpunkt zur Bewegungsbahn darstellen. Mathematisch kann dieser Zusammenhang wie folgt dargestellt werden:

35

Bei Geraden ist

$$40 \quad z = \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \end{bmatrix} = \frac{P_E - P_A}{P_E - P_A} = \frac{1}{\sqrt{(x_E - x_A)^2 + (y_E - y_A)^2}} \begin{bmatrix} x_E - x_A \\ y_E - y_A \end{bmatrix}$$

wobei P_E den Endpunkt und

P_A den Anfangspunkt des Geradensegmentes bezeichnen.

45

Der Vektor e berechnet sich dann durch die Drehung von z nach der oben angegebenen Formel.

Für Kreise ist

$$50 \quad e = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \frac{P_I - P_M}{P_I - P_M} = \frac{1}{\sqrt{(x_I - x_M)^2 + (y_I - y_M)^2}} \begin{bmatrix} x_I - x_M \\ y_I - y_M \end{bmatrix}$$

wobei P_I die aktuelle Position des Antriebs und

P_M den Mittelpunkt des Kreises darstellen.

55

Für mehrdimensionale Koordinatensysteme gilt ebenfalls, daß die Fehlervektoren e_1, e_2, \dots, e_{n-1} jeweils senkrecht zum Zielvektor z stehen und damit eine Fehlerfläche bzw. einen (n-1)-dimensionalen Fehlerraum senkrecht zum Zielvektor z aufspannen.

60

Bei der praktischen Anwendung im Bahnregelsystem wird von der tatsächlichen Position des Antriebssystem auszugehen sein. Der (erste) Fehlervektor e kann bestimmt werden, indem ausgehend von der tatsächliche Position das Lot auf die gewollte Bewegungsbahn gefällt wird. Durch einfache Berechnung kann der zu diesem Fehlervektor e senkrechte Zielvektor z ermittelt werden. Anschließend könnten bei mehrdimensionalen Koordinatensystemen die weiteren e-Vektoren (also Fehlerabweichungen in den anderen Dimensionen) bestimmt werden. Wird allerdings der Fehlervektor in der dargestellten Weise durch Ermittlung des Lots ermittelt, ergibt sich per Definition des Lotes, daß der Fußpunkt des Lots und die tatsächliche Position auf einer Geraden liegen, deren Richtung senkrecht zur Richtung der Bahn ist. Wird dann der Fehlervektor in dieser Richtung definiert, entspricht die tatsächliche Position der Summe aus Fußpunkt und Abstand, multipliziert mit dem Fehler-Vektor. Die verbleibenden (n-2) Fehlervektoren werden aufgrund dieser Definition des (ersten) Fehlervektors immer Null sein. Dies ergibt den besonderen Vorteil, daß die Bewegung unabhängig von der Dimension des Raumes, in dem die Bewegung stattfindet, immer mit nur zwei Reglern geregelt werden kann, nämlich einem Richtungsregler (z-Regler) und einem Abweichungsregler (e-Regler). Gerade bei Mehrachsenantriebssystemen führt

65

dies zu einer deutlichen Reduzierung des Regelaufwands.

Dieses Vorgehen ist in vereinfachter Weise in Fig. 11 dargestellt, am Beispiel der Bewegung entlang eines Kreisbogensegments. An dieser Stelle sei nochmals auf den Zusammenhang zu dem in Bezug auf Fig. 4 erläuterten Regelsystem verwiesen.

Wenn eine kreisbogenförmige Bahn gemäß Fig. 11 vom Antriebssystem abgefahren werden soll, wird es besonders nützlich sein, die Beschleunigungsvorsteuerung zu nutzen, die für den Fall der Kreisbahn dargestellt werden kann:

$$a_{\text{e Vorsteuerung}} = \frac{v_z^2}{r}$$

Die Zielkomponente (Index z) entspricht hier der Tangentialkomponente und die Fehlerkomponente (Index e) entspricht der Radialkomponente der Bewegung. Die Beschleunigungsvorsteuerung im Abweichungsregelkreis ergibt sich somit aus der im Richtungsregler beobachteten Geschwindigkeit (v_z) und dem durch die Referenzpunkte gegebenen Radius (r) der Kreisbahn.

Patentansprüche

1. Regelsystem für elektrische Antriebe, umfassend:
 - einen Beobachter (1), der ein erstes Antriebsausgangssignal (dy) und ein erstes Antriebseingangssignal (du) empfängt und ein erstes Zustandsänderungssignal (v) und ein zweites Zustandsänderungssignal (a) ausgibt;
 - einen ersten Regelverstärker (4), der von einem ersten Differenzbildner (3) ein aus dem ersten Antriebsausgangssignal (y) und einem ersten Vorgabesignal (w) gebildetes Differenzsignal empfängt;
 - einen zweiten Regelverstärker (5); und
 - einen dritten Regelverstärker (6);
 wobei die Ausgangssignale der Regelverstärker (4-6) zum Antriebseingangssignal zusammengesetzt werden, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Zusammensetzung der Ausgangssignale der Regelverstärker erfolgt, in dem:
 - ein zweiter Differenzbildner (11) ein Differenzsignal aus dem ersten Zustandsänderungssignal (v) und dem Ausgangssignal des ersten Regelverstärkers (4) bildet und dieses dem zweiten Regelverstärker (5) einspeist; und
 - ein dritter Differenzbildner (12) ein Differenzsignal aus dem zweiten Zustandsänderungssignal (a) und dem Ausgangssignal des zweiten Regelverstärkers (5) bildet und dieses dem dritten Regelverstärker (6) einspeist.
2. Regelsystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß
 - der Antrieb einen gemessenen Positionssignalvektor (y) ausgibt, dessen Änderung das erste Antriebsausgangssignal (dy) darstellt;
 - der Antrieb einen vom Reglersystem gelieferten Stromsignalvektor (u) empfängt, dessen Änderung das erste Antriebseingangssignal darstellt;
 - das erste Vorgabesignal (w) ein Positionsvorgabevektor ist;
 - das erste Zustandsänderungssignal (v) ein Positionsänderungssignal ist; und
 - das zweite Zustandsänderungssignal (a) ein Geschwindigkeitsänderungssignal ist.
3. Regelsystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß:
 - zwischen erstem Regelverstärker (4) und zweitem Differenzbildner (11) ein zweiter Begrenzer (13) eingeschaltet ist;
 - zwischen zweitem Regelverstärker (5) und drittem Differenzbildner (12) ein dritter Begrenzer (14) eingeschaltet ist; und
 - am Ausgang des dritten Regelverstärkers (6) unmittelbar ein vierter Begrenzer (15) angekoppelt ist.
4. Regelsystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß
 - der zweite Differenzbildner (11') einen weiteren addierenden Eingang besitzt, an welchem ein Geschwindigkeitsvorsteuersignal eingespeist wird; und
 - der dritte Differenzbildner (12') einen weiteren addierenden Eingang besitzt, an welchem ein Beschleunigungsvorsteuersignal eingespeist wird.
5. Regelsystem nach Anspruch 3, welches für die Regelung elastischer Systeme geeignet ist, dadurch gekennzeichnet, daß:
 - der Beobachter (1) weiterhin ein drittes und ein viertes Zustandsänderungssignal (vD, aD) bereitstellt, die die Änderungen der elastischen Komponenten des Antriebs repräsentieren;
 - ein vierter Differenzbildner (50) ein Differenzsignal aus dem Ausgangssignal des vierten Begrenzers und dem dritten Zustandsänderungssignal (vD) des Beobachters bildet und dieses an einen vierten Regelverstärker (52) abgibt;
 - ein fünfter Differenzbildner (51) ein Differenzsignal aus dem von einem fünften Begrenzer (54) begrenzten Ausgangssignal des vierten Regelverstärkers (52) und dem vierten Zustandsänderungssignal (aD) des Beobachters bildet und dieses an einen fünften Regelverstärker (53) abgibt, dessen Ausgangssignal über einen sechsten Begrenzer (55) als Antriebseingangssignal bereitgestellt wird.
6. Regelsystem nach Anspruch 3, welches für die Regelung von Antriebssystemen mit beliebig vielen Zustandsvariablen geeignet ist, dadurch gekennzeichnet, daß
 - der Beobachter (1) für jede Zustandsvariable ein Zustandsänderungssignal bereitstellt, das die Änderungen der jeweiligen Zustandsvariable repräsentiert;
 - für jede Zustandsvariable ein weiterer Differenzbildner, ein Differenzsignal aus dem Ausgangssignal des vorhergehenden Begrenzers und des vorhergehenden Zustandsänderungssignals des Beobachters bildet und dieses an einen weiteren Regelverstärker abgibt, wobei der letzte Regelverstärker in dieser Kaskade an einen

weiteren Begrenzungen gekoppelt ist, der ein begrenztes Ausgangssignal als Antriebsingangssignal bereitgestellt.
 7. Regelsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß es zumindest teilweise durch einen befehlsgesteuerten Rechenprozessor realisiert ist.

8. Verfahren zur Bahnregelung eines elektrischen Antriebs, dessen mögliche Bewegungsbahnen in einem festen Koordinatensystem der Dimension n liegen, insbesondere unter Anwendung eines Regelsystems gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, die folgenden Schritte umfassend:

- Bestimmung eines Sollpunktes auf einer vorgegebenen Bewegungsbahn im festen Koordinatensystem;
- Bestimmung eines mitbewegten Koordinatensystems (61) in diesem Sollpunkt, welches durch einen Zielvektor (z) und mindestens einen Fehlervektor (e) definiert ist, wobei der Zielvektor tangential zur vorgegebenen Bewegungsbahn verläuft und jeder Fehlervektor senkrecht zum Zielvektor steht;
- Bestimmung der Abweichung (62) zwischen der aktuellen Position des Antriebs und der vorgegebenen Bewegungsbahn innerhalb des mitbewegten Koordinatensystems;
- Bestimmung des erforderlichen Stellgrößenvektors (63) zum Ausgleich der bestimmten Abweichung;
- Rücktransformation (64) des Stellgrößenvektors in das feste Koordinatensystem des Antriebs;
- Ansteuerung des Antriebs mit dem rücktransformierten Stellgrößenvektor.

9. Verfahren nach Anspruch 8, die folgenden Schritte umfassend:

- Bestimmung einer Bewegungsbahn (60) im festen Koordinatensystem durch Aufteilung der Bahn in mehrere Bahnsegmente und Bestimmung mehrerer Referenzpunkte;
- Bestimmung des aktuellen Sollpunktes auf der Bewegungsbahn durch Fällen des Lotes von der aktuellen Position des Antriebs auf die Bewegungsbahn;
- Bestimmung des mitbewegten Koordinatensystems (61), welches durch den Zielvektor (z) und den mindestens einen Fehlervektor (e) definiert ist, wobei der Ursprung des mitbewegten Koordinatensystems im Sollpunkt auf der Bewegungsbahn liegt;
- Bestimmung (62) des Abstands des aktuellen Sollpunkts zum Endpunkt des Bahnsegments als Abweichung in Richtung des Zielvektors (z) und des Abstands der aktuellen Position des Antriebs zum aktuellen Sollpunkt als Abweichung in Richtung der Fehlervektoren (e);
- Bestimmung des erforderlichen Stellgrößenvektors (63) zum Ausgleich der bestimmten Abweichungen;
- Rücktransformation (64) des Stellgrößenvektors und Ansteuerung des Antriebs.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Fehlervektor (e) im Sollpunkt parallel zum Lot von der aktuellen Position des Antriebs auf die Bewegungsbahn liegt.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß außer dem Zielvektor (z) und dem ersten Fehlervektor bis zu $n-2$ weitere Fehlervektoren bestimmt werden, so daß das mitbewegte Koordinatensystem maximal die Dimension n aufweist.

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

Fig. 1

- Stand der Technik -

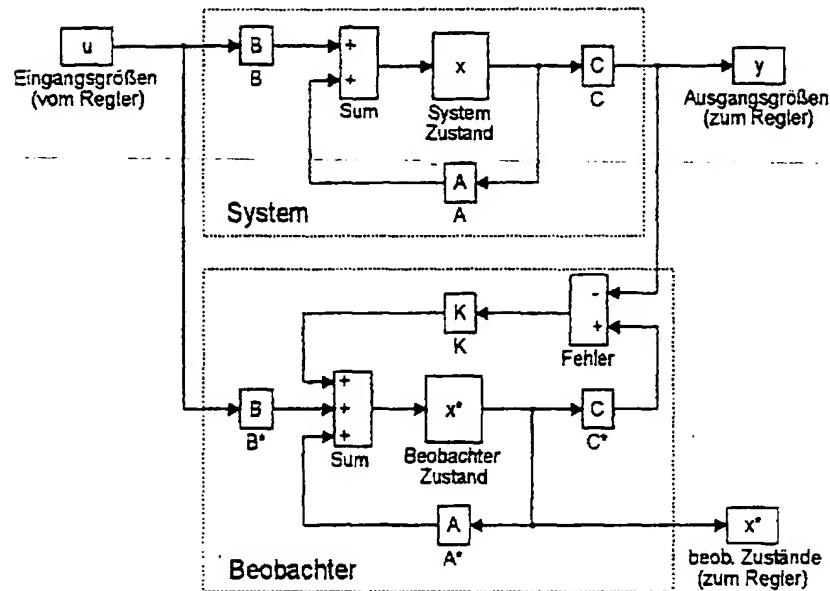
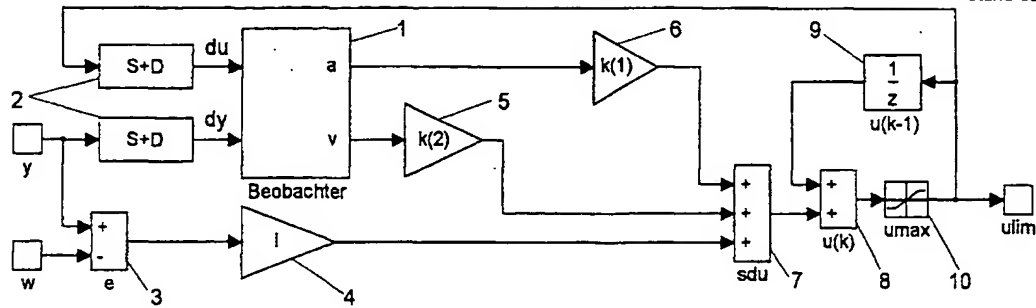


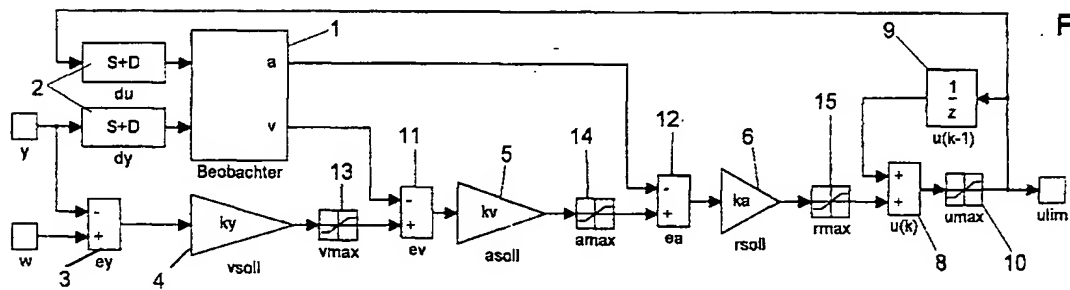
Fig. 2

- Stand der Technik -



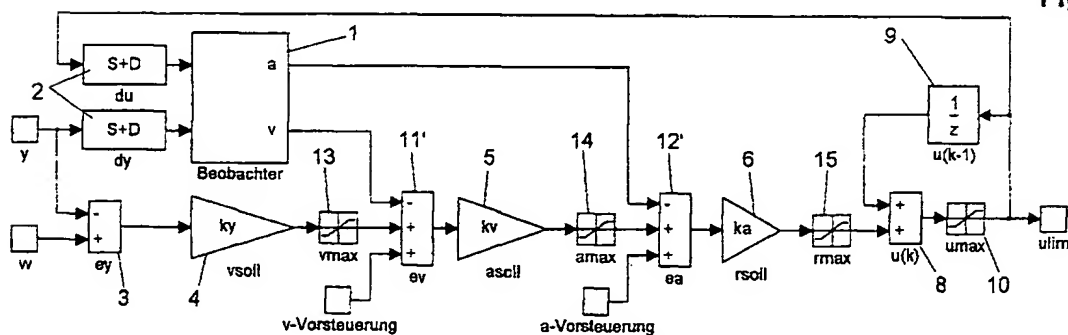
inkrementelle Zustandsregelung

Fig. 3



virtuelle Kaskadenregelung

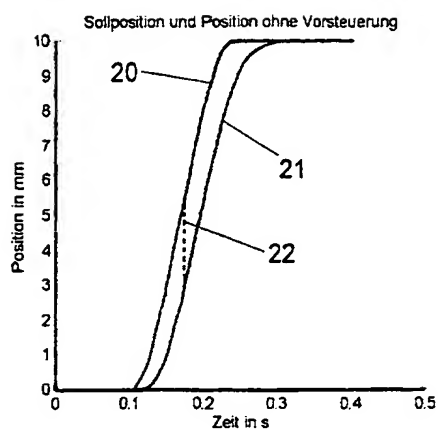
Fig. 4



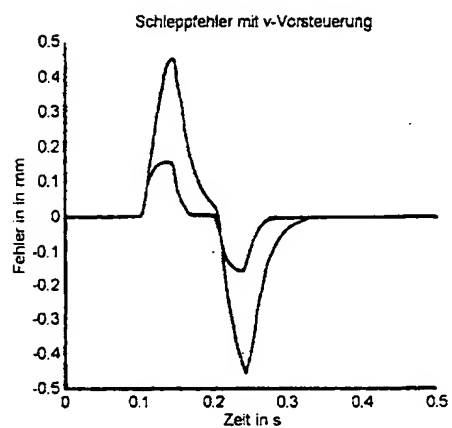
virtuelle Kaskadenregelung mit Vorsteuerung

Fig. 5

a)



b)



c)

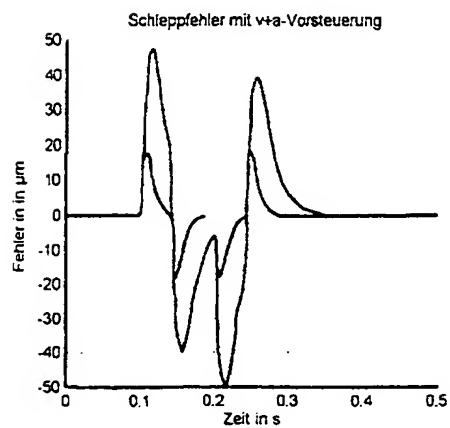
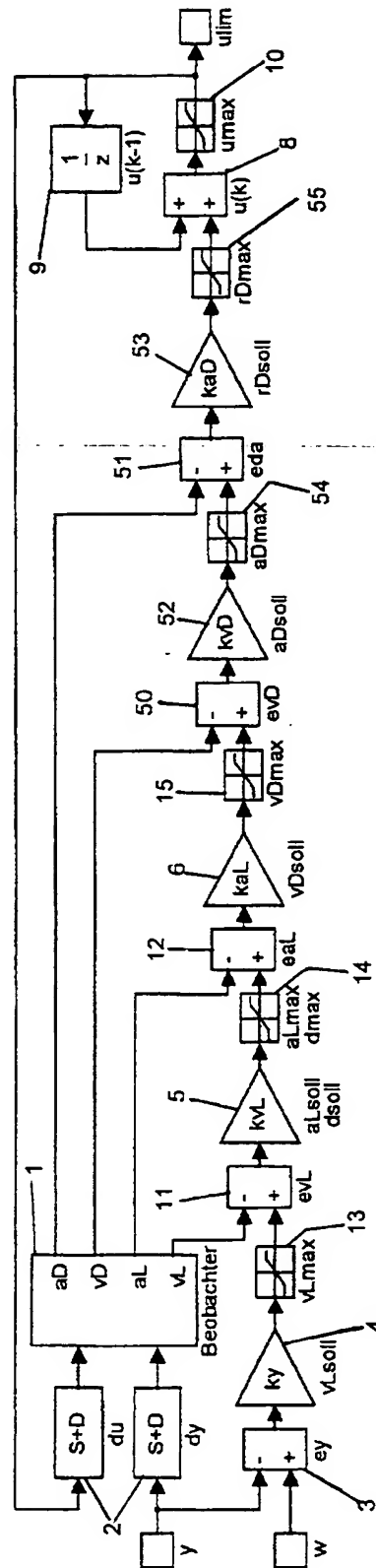


Fig. 6



virtuelle Kaskadenregelung für elastisches System

Fig. 7

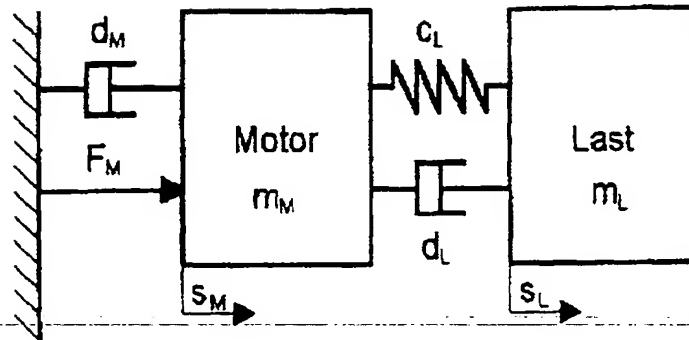


Fig. 8

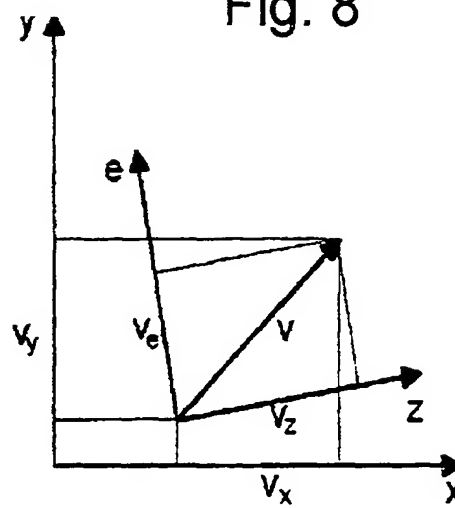


Fig. 9

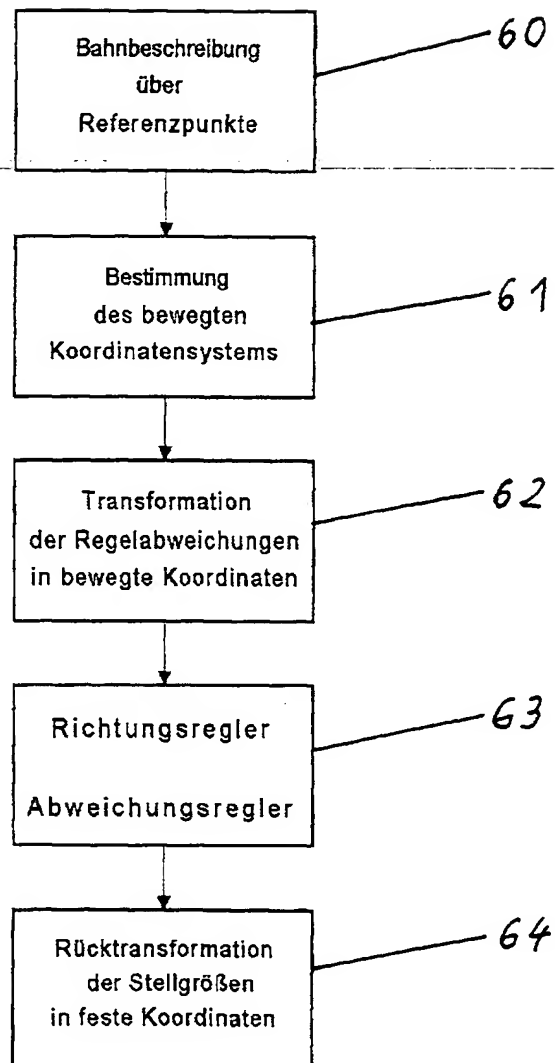


Fig. 10

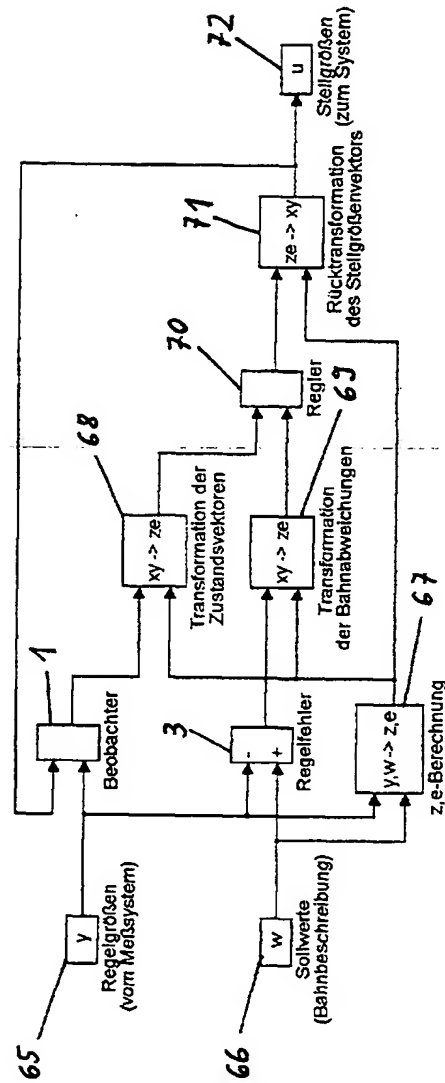
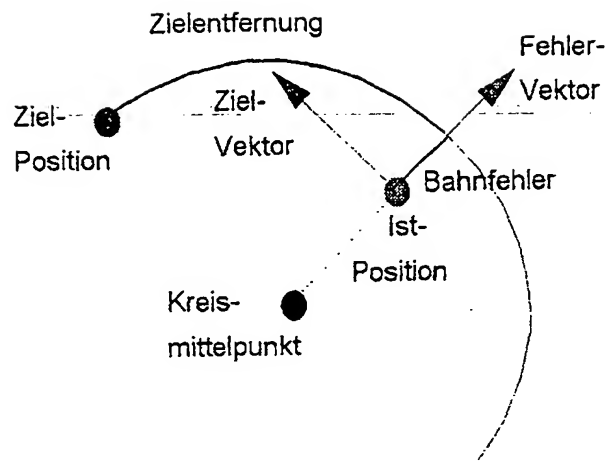


Fig. 11



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.